

S-G 알고리즘을 이용한 로봇 매니플레이터의 적응제어

°정사철*, 김진환*, 이정휴**, 함운철*

* 전북대학교 공과대학 전자공학과

** 이리농공전문대학 전자계산학과

Adaptive Control for Robot Manipulator Using Speed-Gradient Algorithm

° Sa Cheul Jeong*, Jin Whan Kim*, Jeong Hyu Lee** and Woon Chul Ham*

* Dept. of Elec. Eng. Chonbuk Nat'l Univ.

** Dept. of Computerscience. Nat'l College of IRI A.T.

Abstract

In this paper we propose the new adaptive control algorithm by using S-G algorithm based on the error equations derived by Slotina. We verify the validity of the proposed controller and convergence of three type parameter estimation law based on S-G algorithm from the computer simulation.

1. 서론

생산 시스템의 자동화, 사람의 접근이 어려운 작업환경, 조립 공정 등에서 로봇 매니플레이터의 이용범위가 넓어지면서 로봇 매니플레이터의 정확한 제어를 위한 제어기법이 요구되고 있다. 관절형 로봇 매니플레이터의 경우 큰 비선형성과 각 링크사이의 연성, 그리고 부하하중에 변화에 따른 매개변수의 변화, 측정된 매개변수의 불확실성 등으로 복잡한 동특성을 나타낸다. 이러한 동특성을 고려하지 않을 고전적 선형 서보 제어기법은 매개변수가 변하는 상황이나 고속 운영시 정확성을 기대하기 어렵다. 만약 로봇 매니플레이터의 매개변수들을 미리 알 수 있다면 잘 알려진 computed torque method를 이용하여 제어를 할 수 있다. 이 기법은 비선형 부분을 보상(compensation)하고 관성 행렬을 궤환된 오차에 곱하여 각 조인트의 운동을 독립화(decoupling)시키는 제어 방법으로서 정확한 궤적 추종을 보장할 수 있다. 그러나 매 시간 변화하는 매개변수를 정확히 알기가 어려우므로 정확한 제어가 힘들며 불안정하게 될 수도 있다. 이러한 매개변수에 대한 민감성은 직접 구동식 로봇이나 빠른 매니플레이터의 제어시 더욱 심각하다. 따라서 최근 로봇 매니플레이터의 정확한 제어를 위한 적응제어 기법에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다.[3]-[11]

적응제어 기법은 로봇 매니플레이터의 가변적 동특성에 적절히 대처할 수 있으므로 그 유용성이 크며, 특히 부하의 변

동이나 다양한 작업도구의 변화를 요하는 작업환경하에서 고전적 제어방식보다 나은 작업성능을 얻을 수 있다. 적응제어 기법을 로봇 매니플레이터 제어에 이용한 연구들은 크게 두 부분으로 나눌 수 있다.

한 연구부분은 로봇 매니플레이터를 근사화하여 적응제어 기법을 적용한 것으로 1985년 이전에 이어져왔다. 이러한 방법을 이용한 연구들은 로봇의 매개변수들이 느리게 변화한다고 가정하고 로봇 매니플레이터의 운동방정식을 선형화하여 적응제어 기법을 적용한 것이다. 이 기법들은 선형 시불변 시스템을 위한 적응 제어기법인 MRAC(model reference adaptive control)이나 STR(self tuning regulator)의 개념이 비선형 시변인 로봇 매니플레이터에 적용되었기 때문에 여러 문제점들을 가지고 있다. 즉, 선형화된 매니플레이터 시스템의 매개변수가 충분히 느리게 변화할 때만 안정도의 증명이 보장되어진다. 또한 매개변수 수렴에 있어서 중요한 조건인 충분한 여기조건(persistency of excitation)과 외란의 영향이 있을 경우에 대한 강인성에 관한 문제들을 다루고 있지 않아 실제로 구현하는데 어려움이 있다.

다른 연구부분은 로봇 매니플레이터의 동특성을 선형 매개변수화하여 적응제어 기법을 적용한 것으로 1985년을 구분점으로 많은 발전이 이루어져 왔다. 간접 적응 제어방식으로 중요한 것으로는 Middleton과 Goodwin[3]의 방식과 Hsu et al[4], 등의 방식이 있다. 직접적응제어 방식에서 중요한 두가지 연구는 Craig et al.[4]과, Slotine과 Li에[8] 의해 이루어졌다. Craig et al.[4]의 연구에서는 computed torque method 방식에 기초한 직접적응 제어를 제안하고 있다. 매개변수의 추정에는 각 조인트의 위치오차와 속도오차가 필터를 거쳐 이용되며 gradient 알고리즘의 형태를 갖는다. 이 방식에서는 전달함수가 강정실(strictly positive real)이 되도록 필터의 계수와 PD 궤환 이득을 정하여 Kalman-Yacubovich 보조정리를 이용하여

안정도를 증명하고 광역적인 수렴성을 보였다. 그러나 이 기법은 실제로 측정하기 어려운 각가속도의 측정을 요하며 추정된 관성행렬의 역행렬을 계산해야 하는 문제점을 가지고 있다. Slotine과 Li의 연구에서는 로봇 운동방정식의 계수 행렬들 사이의 skew-symmetry의 성질을 이용하여 보다 간단한 제어기를 제안하고 있다. 이 기법은 각 가속도의 측정이 불필요하며 추정된 관성행렬의 역행렬도 필요치 않다. 따라서 Slotine과 Li[8]의 기법이 실제로 구현하기에 보다 편리한 것으로 여겨진다.

본 논문은 Lyapunov 설계방법에 기초하여 로봇 매니플레이터를 연속시간 직접 적응제어 알고리즘을 제안하고 있다. 제안된 알고리즘은 각가속도의 측정을 요하지 않으며 관성행렬의 역행렬 계산도 필요치 않다. 또한 로봇 매니플레이터 운동방정식의 계수행렬들 사이의 skew-symmetry 성질을 이용하지 않고 제어기를 설계하였다.

논문의 구성은 2장에서 로봇 매니플레이터의 운동방정식을 3장에서 제어법칙을 다루었다. 4장에서는 S-G 알고리즘을 간단하게 소개하고 S-G 알고리즘을 근거로한 새로운 매개변수 추정법칙을 제안하였다. 5장에서는 앞에서 고찰한 이론의 타당성을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인 하여 보았다. 결론 및 추후과제를 6장에서 다루었다.

2. 로봇 매니플레이터의 운동방정식

n개의 자유도를 갖는 로봇 매니플레이터의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\tau = M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}) \quad (1)$$

여기서

q: 관절의 각도,	$q \in R^n \times 1$
τ : 관절에 가해지는 토크,	$\tau \in R^n \times 1$
M(q): 관성행렬,	$M \in R^n \times n$
C(q, \dot{q}): 코리올리 힘, 원심력행렬,	$C \in R^n \times n$
G(q): 중력,	$G \in R^n \times 1$
F(q, \dot{q}): 마찰력,	$F \in R^n \times 1$

로봇 매니플레이터의 관성행렬 M(q)와 원심력행렬

C(q, \dot{q})사이의 skew-symmetry 성질을 이용하지 않으므로

C(q, \dot{q}), G(q)와 F(q, \dot{q})를 따로 구분할 필요가 없다. 그러면 식(1)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q}) \dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q})$$

$$\tau = M(q) \ddot{q} + H(q, \dot{q}) \quad (2)$$

조인트의 원하는 위치와 속도 궤적은 q_d , \dot{q}_d , 가속도 궤적은 \ddot{q}_d 로 표시한다.

다음과 같이 가속도, 속도, 그리고 위치 오차를 정의한다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \tilde{\dot{q}} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{q} - \tilde{q}_d \\ \tilde{\dot{q}} - \tilde{\dot{q}}_d \\ \tilde{q} - \tilde{q}_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

제어의 목적은 주어진 궤적을 따라 \tilde{q} 와 $\tilde{\dot{q}}$ 를 0으로 보내는 것이다.

3. 제어법칙

식(1)과 같은 Euler-Lagrange 방정식을 미지의 계수들과 알고있는 함수들로 분리하여 linear regressor 형태로 표시하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.[5]

$$\tau = \Phi(q, \dot{q}, \ddot{q}) \theta \quad (4)$$

Φ 는 q, \dot{q}, \ddot{q} 가 측정 가능하다면 계산에 의하여 구할수 있는 행렬이고, θ 는 미지의 매개변수 벡터이다. 이때 미지의 매개변수 θ 는 4절의 S-G알고리즘에 의하여 추정되어질 것이다.

3-1. 오차 방정식

$\hat{\theta}$ 을 미지의 매개변수 θ 의 추정치로 $\tilde{\theta}$ 를 이에 대한 오차로 정의한다.

$$\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$$

$$\dot{\tilde{\theta}} = \dot{\hat{\theta}} \quad (5)$$

정상상태 오차 벡터 s를 다음과 같이 정의 하자.[8]

$$s = \dot{\tilde{q}} + \lambda \tilde{q} \quad (6)$$

여기서 λ 는 양의 상수로 임의로 정한다. 또한 기준궤적을 q_d 라고 하고 다음과 같이 q_r 을 정의한다.

$$\ddot{q}_r = \ddot{q}_d - \lambda \dot{\tilde{q}} \quad (7)$$

따라서 본절에서는 Slotine이 고찰한 오차 방정식으로 부터 다음과 같은 제어 법칙을 적용하기로 한다.

$$\tau = M(q) \ddot{q}_r + H(q, \dot{q}) - \frac{1}{2} M(q, \dot{q}) s - k(t) s$$

$$= W(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, s) \theta - k(t) s \quad (8)$$

여기서

$$W(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, s) = M(q) \ddot{q}_r + H(q, \dot{q}) - \frac{1}{2} M(q, \dot{q}) s$$

$k(t)$ 는 궤환이득으로 양의 값을 가지며, 추정 알고리즘으로 적절히 조절된다.

위 제어법칙에서 매개변수 θ 를 모르기 때문에 추정치인 $\hat{\theta}$ 을 θ 대신 사용하게 된다. 즉 실제로 사용되는 제어법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau &= M(q) \dot{q}_r + H(q, \dot{q}) - \frac{1}{2} \dot{M}(q, \dot{q})s - k(t)s \\ &= W(q, \dot{q}, \ddot{q}, s) \theta - k(t)s \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $M(q)$, $H(q, \dot{q})$ 와 $\dot{M}(q)$ 는 각각 $M(q)$, $H(q, \dot{q})$ 와 $M(q)$ 의 추정치이다.

식(9)를 식(1)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$M(q) \dot{s} = \dot{M}(q) \dot{q}_r + H(q, \dot{q}) - \frac{1}{2} \dot{M}(q, \dot{q})s - k(t)s \quad (10)$$

여기서, $\dot{M}(q) = \dot{M}(q) - M(q)$

$$H(q, \dot{q}) = H(q, \dot{q}) - H(q, \dot{q})$$

식 (10)의 오차 방정식은 4결의 S-G 알고리즘의 설계에 이용될 것이다.

4. Speed-Gradient 알고리즘

본절에서는 Fradkov에 의하여 제안되었던 매개변수 추정 법칙에 대하여 간략히 살펴보고 로봇트 매니퓰레이터를 위한 새로운 매개변수 추정법칙을 S-G 알고리즘에 근거로 하여 유도하도록 한다.

일반적으로 적응제어 시스템의 오차 동특성은 비선형 미분방정식이며 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\dot{x} = F(x, \phi, t), \quad t \geq 0 \quad (11)$$

여기서 $x(t) \in R^n$ 는 오차 상태벡터이고 $\phi(t) \in R^m$ 은 매개변수추정오차벡터 ($\phi(t) = \theta(t) - \theta^*$)이며 $F(\cdot) : R^{n+m+1} \rightarrow R^n$ 은 x, θ 에 대해서 연속적으로 미분 가능 벡터 함수이다. 제어 문제는 매개변수 추정 법칙을 찾는 것이다.

$$\dot{Q}_i(t) = Q_i(x_o^t, \theta_o^t, t) \quad (12)$$

여기서 x_o^t 와 θ_o^t 는 집합 $\{x(s), 0 \leq s \leq t\}$, $\{\theta(s), 0 \leq s \leq t\}$ 를 의미한다. 이 기준은 어떤 목적함수 $Q_i = Q_i(x_o^t, \theta_o^t, t)$ 의 최소값을 요구한다고 가정한다. $Q_i(t) = Q(x(t), t)$ 인 local form으로, 여기서 $Q(x(t), t) \geq 0$ 은 스칼라 smooth 목적함수이다. 함수 $\xi(x, \theta, t)$ 는 Q_i 의 시간 미분치로 정의한다.

$$\text{이때, } \xi(x, \theta, t) = (\nabla_x Q)^T F(x, \theta, t) \quad (13)$$

여기서 $\nabla_x Q$ 는 x 에 대한 Q 의 기울기이다.

위의 정의를 이용하여, Fradkov가 제안한 매개변수 추정 알고리즘은 다음과 같이 3 가지 형태로 나타낼 수 있다.

$$\text{(미분형)} \quad \dot{\theta}(t) = -\Gamma \nabla_{\theta} \xi(x, \theta, t) \quad (14)$$

$$\text{(적분형)} \quad \theta(t) = -\psi(x, \theta, t) - \Gamma \int_0^t \nabla_{\theta} \xi(x, \theta, s) ds \quad (15)$$

$$\text{(한정형)} \quad \theta(t) = \theta^0(x, t) - \gamma(x, t) \psi(x, \theta, t) \quad (16)$$

여기서 Γ 은 대칭인 양의 행렬, $\psi(\cdot)$ 은 pseudo gradienty 조건 $\psi^T \nabla_{\theta} \xi \geq 0$ 을 만족하며, $\nabla_{\theta} \xi$ 는 θ 에 대한 ξ 의 기울기이며 $\gamma(x, t) > 0$ 은 스칼라이다.

[정 리]

시스템(11), (15)은 초기조건 $x(0), \theta(0)$ 에서 단일해를 가지며, 또한 함수 $F(x, \theta, t)$, $\nabla_x Q(x, t)$, $\psi(x, t)$, $\nabla_{\theta} \xi(x, \theta, t)$ 은 t 에서 부분적으로 유한값을 갖고 $[(x, \theta): \|x\| + \|\theta\| \leq \beta \leq \infty, t \geq 0]$ 에서 유한한 다음 조건들이 주어진다.

(a)Growth 조건: $\|x(t)\| \rightarrow \infty$ 일때 $\text{inf} Q(x, t) \rightarrow \infty$

(b)Convexity 조건: 함수 $\xi(x, \theta, t)$ 는 θ 에 대해 convex 이다.

(c)Attainability 조건: 벡터 $\theta^* \in R^m$ 와 $Q > 0$ 일때 $\rho(Q) > 0$ 인 함수 $\rho(Q)$ 가 존재하고 다음을 만족시킨다.

$$\xi(x, \theta^*, t) \leq -\rho(Q) \quad (17)$$

그러면 시스템(11), (17)의 모든 해는 유한하며, $t \rightarrow \infty$ 일때 $Q_i \rightarrow 0$ 이다.

[증 명]

다음과 같은 Lyapunov 함수를 고려한다.

$$V_i = Q_i + \frac{1}{2} \{ \theta(t) - \theta^* + \psi(\cdot) \}^T \Gamma^{-1} \{ \theta(t) - \theta^* + \psi(\cdot) \} \quad (18)$$

Convexity 와 attainability 조건에 의해서 다음 부등식이 유도된다.

$$\dot{\xi}(x, \theta, t) - (\theta - \theta^*)^T \nabla_{\theta} \xi \leq \xi(x, \theta^*, t) \quad (19)$$

시스템의 궤적을 따라 V_i 의 시간 미분형은 다음과 같다.

$$\dot{V}_i = \dot{Q}_i - \{ \theta(t) - \theta^* + \psi(x, \theta, t) \}^T \nabla_{\theta} \xi(x, \theta^*, t) \quad (20)$$

Pseudo gradientity 조건 $\psi^T \nabla_{\theta} \xi(x, \theta, t) \geq 0$ 으로부터

$$\dot{V}_i \leq \xi(x, \theta, t) - (\theta(t) - \theta^*)^T \nabla_{\theta} \xi(x, \theta^*, t) \quad (21)$$

식 (17), (19)로 부터 \dot{V}_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{V}_i \leq \xi(x, \theta^*, t) \leq -\rho(Q) < 0 \quad (22)$$

그러므로 $t \rightarrow \infty$ 일때 $Q_i \rightarrow 0$ 이다. ■

[정 리 2]

Convexity와 Attainability 조건들이 식 (17)에서 $\rho(Q)=0$ 을 충족시킨다고 하자. 이때, 시스템(11), (15)의 모든 해는 유한값을 갖는다.

[증 명]

정리 1의 증명과 같이

$$\dot{V}_t \leq \xi(x, \theta, t) \leq -\rho(Q) \leq 0 \quad (23)$$

그러므로 Q_t 는 유한값을 갖는다.

[정 리3]

Convexity와 Attainability조건들이 만족되고 다음과 같은 Strong pseudo gradientity조건을 충족 시킨다고 하자. 즉 $k>0$ 와 $\delta \geq 1$ 에 대해서

$$\psi(x, t)^T \nabla_{\theta} \xi(x, \theta, t) \geq k \|\nabla_{\theta} \xi(x, \theta, t)\|^{\delta} \quad (24)$$

$$k\gamma(x, t) \|\nabla_{\theta} \xi(x, \theta, t)\|^{\delta-1} \geq \|\theta^0 - \theta^*\| \quad (25)$$

이때 시스템 (11) (15)의 모든 해는 유한값을 가지며 $t \rightarrow \infty$ 일때 $Q_t \rightarrow 0$ 이다.

[증 명]

$V_t = Q_t$ 라하자. 시스템 궤적에 대한 V_t 의 시간 미분형은 다음과 같다.

$$\dot{V}_t = \dot{Q}_t = \xi(x, \theta, t) \quad (26)$$

Convexity조건에 의하여

$$\begin{aligned} \dot{V}_t &= \xi(x, \theta, t) \leq \xi(x, \theta^*, t) + (\theta - \theta^*)^T \nabla_{\theta} \xi \\ &= \xi(x, \theta^*, t) + (\theta - \theta^0)^T \nabla_{\theta} \xi + (\theta^0 - \theta^*)^T \nabla_{\theta} \xi \\ &\leq \xi(x, \theta^*, t) - \gamma(x, t) \psi(\cdot)^T \nabla_{\theta} \xi + (\theta^0 - \theta^*)^T \nabla_{\theta} \xi \end{aligned} \quad (27)$$

식 (16)으로 부터

$$\begin{aligned} \dot{V}_t &\leq \xi(x, \theta^*, t) - k\gamma(x, t) \|\nabla_{\theta} \xi(\cdot)\|^{\delta} + (\theta^0 - \theta^*)^T \nabla_{\theta} \xi \\ &\leq \xi(x, \theta^*, t) - k\gamma(x, t) \|\nabla_{\theta} \xi(\cdot)\|^{\delta} + \|\theta^0 - \theta^*\| \|\nabla_{\theta} \xi\| \end{aligned} \quad (28)$$

식 (17)로 부터

$$\dot{V}_t \leq \xi(x, \theta^*, t) \leq -\rho(Q) < 0 \quad (29)$$

그러므로 $t \rightarrow \infty$ 일때 $Q_t \rightarrow 0$ 이다. ■

위에서 살펴본 매개변수 추정 알고리즘을 3절의 로보트 매니플레이터의 오차방정식에 적용하여 새로운 매개변수 추정법칙을 얻도록 한다.

3절의 식(10)과 같은 로보트 매니플레이터 오차 방정식을 Fradkov가 제안한 S-G 알고리즘에 기초하여 로보트 매니플레이터를 위한 새로운 매개변수 추정법칙을 얻을 수 있다.

$\psi(t)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\psi(t) = W^T s \quad (30)$$

이때 ψ 는 $\psi^T W^T s \geq 0$ 이므로 pseudo gradientity조건을 만족한다.

목적함수 Q_t 는 local 형태로 다음과 같이 놓는다.

$$Q_t = \frac{1}{2} s^T M(q) s \quad (31)$$

위 식으로 나타내어진 알고리즘의 안정성은 Lyapunov함수를 가지고 증명할 수 있다.

$$V(t) = Q_t = \frac{1}{2} s^T M(q) s \quad (32)$$

$V(t)$ 의 시간 미분치는 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \dot{Q}_t = s^T M(q) \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M}(q) s \\ &= s^T (M(q) \dot{s} + \frac{1}{2} \dot{M}(q) s) \\ &= -s^T k(t) s \leq 0 \end{aligned} \quad (33)$$

여기서 식(31)과 같이 정의할경우 S-G알고리즘의 $\xi(x, \theta, t)$ 는 다음과 같다.

$$\xi(x, \theta, t) = s^T M(q) [M^{-1} W \psi - M^{-1} k s] = s^T W \psi - s^T k s \quad (34)$$

또한 $\nabla_{\theta} \xi(x, \theta, t)$ 는 다음과 같다.

$$\nabla_{\theta} \xi(x, \theta, t) = W^T s \quad (35)$$

따라서 S-G알고리즘과 같이 3가지 형태의 매개변수 추정법칙을 얻을 수 있다.

(미분형) $\dot{\theta}(t) = -\Gamma W^T s \quad (36)$

(적분형) $\theta(t) = -\Gamma \Phi - \Gamma \int_0^t W^T s dt \quad (37)$

(한정형) $\theta(t) = \theta^0 - \gamma W^T s \quad (38)$

여기서 Γ 와 γ 는 positive definite 행렬이다.

위와 같이 3가지 매개변수 추정법칙을 2개의 자유도를 갖는 로보트 매니플레이터에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하겠다.

5. 시뮬레이션 및 결과

그림 1와 같은 2개의 링크를 갖는 로봇트 매니퓰레이터를 생각하여 보자.

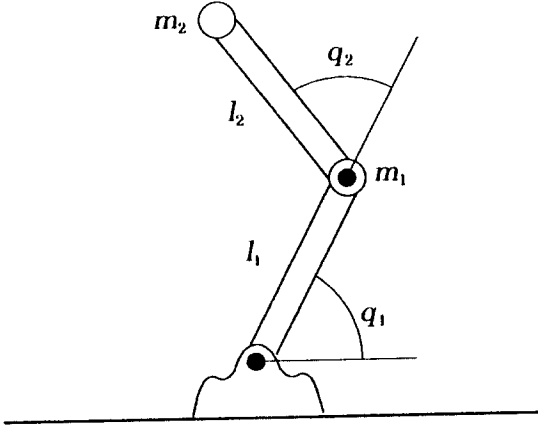


그림 1. 2-링크 매니퓰레이터

각 링크는 point mass로 존재한다고 가정하고, 링크의 질량을 m_1, m_2 , 길이를 l_1, l_2 , 링크의 각도를 q_1, q_2 그리고 입력 토크를 τ_1, τ_2 로 표시하였다.

로봇트 매니퓰레이터의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)$$

여기서

$$\tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix}$$

$$M(q) = \begin{pmatrix} m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 C_2 + (m_1 + m_2) l_1^2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 C_2 \\ m_2 l_1 l_2 S_2 & m_2 l_2^2 \end{pmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} -2m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_2 - m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_1 & 0 \\ m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$G(q) = \begin{pmatrix} m_2 l_2 g C_{12} + (m_1 + m_2) l_1 g C_1 \\ m_2 l_2 g C_{12} \end{pmatrix}$$

표기의 간략화를 위하여 $\sin(q_2)$ 를 S_2 , $\cos(q_1 + q_2)$ 를 C_{12} 등으로 표시하였다. 모르는 매개변수 벡터 θ 를 다음과 같이 놓는다.

$$\theta = [m_1 \quad m_2]$$

$M(q)$ 로 부터 다음을 구할 수 있다.

$$-\frac{1}{2} \dot{M}(q, \dot{q}) = \begin{pmatrix} m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_2 & \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_2 \\ \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 S_2 \dot{q}_2 & 0 \end{pmatrix}$$

위 식으로 부터 $W(q, \dot{q}, \ddot{q}, s)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W(q, \dot{q}, \ddot{q}, s) = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{bmatrix}$$

여기서

$$w_{11} = l_1^2 \ddot{q}_1 + l_1 g C_1$$

$$w_{12} = l_1^2 \ddot{q}_1 + l_2^2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + l_1 l_2 C_2 (2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) + l_1 l_2 S_2 \dot{q}_2 (s[1] + \frac{1}{2} s[2]) - 2\dot{q}_1 - \dot{q}_2 + g(l_2 C_{12} + l_1 C_1)$$

$$w_{21} = 0$$

$$w_{22} = (l_2^2 + l_1 l_2 C_2) \ddot{q}_1 + l_2^2 \ddot{q}_2 + l_1 l_2 S_2 (\frac{1}{2} \dot{q}_2 s[1] + \dot{q}_1^2) + l_2 g C_{12}$$

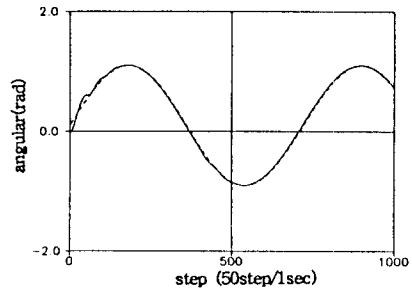
바라는 궤적은 다음과 같은 형태로 발생 시켰다.

$$\theta_{d1} = .1 + \sin(0.5t)$$

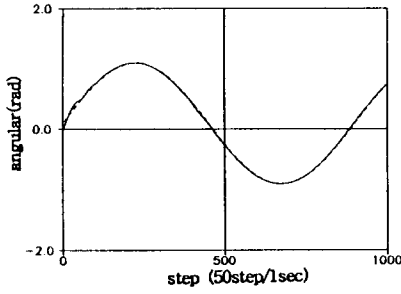
$$\theta_{d2} = .1 + \sin(0.4t)$$

매개변수 m_1, m_2 의 질량은 각각 3kg, 2kg으로 정하였다. 매개변수 초기치는 참값으로 정하였으나 시변 매개변수의 수렴성을 위하여 $t=4\text{sec}$ 인 순간에 m_2 를 2kg에서 3kg으로 변화게 하였다. 다음 그림들은 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 나타내었다.

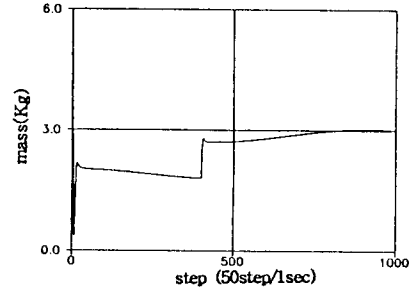
그림 2, 그림 3과 그림 4는 미분형, 적분형과 한정형을 사용하였을때의 출력을 나타낸 그림이며, 점선은 모델의 궤적을 나타내었고 실선은 로봇트 매니퓰레이터의 관절 출력을 나타내고 있다. 이때 $\Gamma=0.5$, $\lambda=4$, $\gamma=0.5$ 로 하였다. 미분형의 경우 초기에 과도응답이 있으나 좋은 수렴 특성을 볼 수 있으며 적분형의 경우는 초기상태에서 부터 과도응답이 거의 없는 매우 양호한 수렴특성을 확인 하였다. 한정형의 경우는 초기상태에서 부터 오차를 0으로 보내는 빠른 수렴특성을 볼 수 있었다.



a) 관절 1의 각도 출력

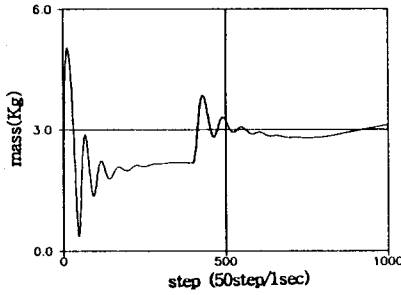


b) 관절 2의 각도 출력



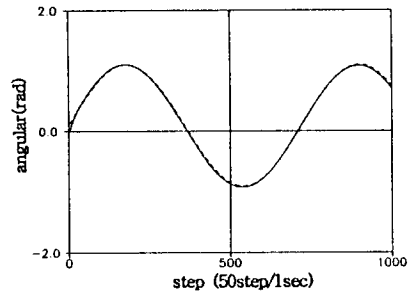
c) 매개변수 m_2

그림 3. 적분형 알고리즘의 응답특성.

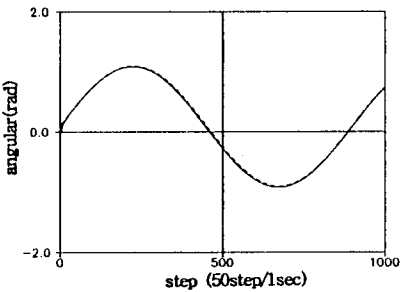


c) 매개변수 m_2

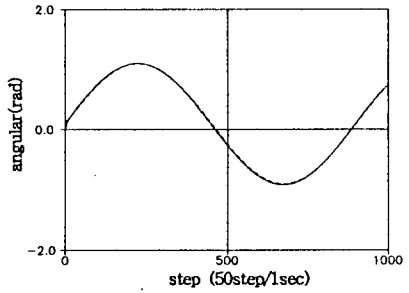
그림 2. 미분형 알고리즘의 응답특성.



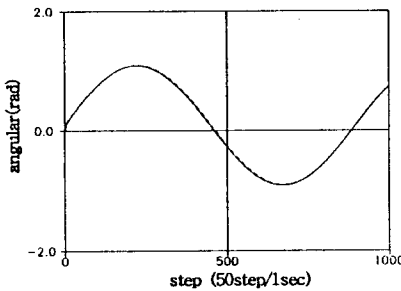
a) 관절 1의 각도 출력



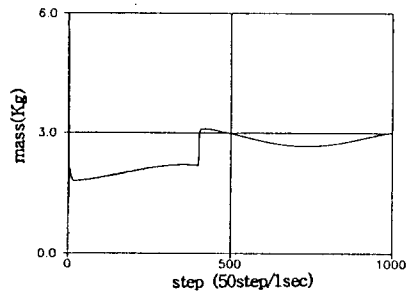
a) 관절 1의 각도 출력



b) 관절 2의 각도 출력



b) 관절 2의 각도 출력



c) 매개변수 m_2

그림 4. 한정형 알고리즘의 응답특성.

6. 결론

본 논문에서는 로봇 매니플레이터를 위한 직접적용제어 알고리즘을 Lyapunove이론에 근거하여 제안 하였다. 제안된 알고리즘은 각기속도의 측정을 요구하지 않으며 위치와 속도의 측정만으로 쉽게 구현되어 진다. 추종오차와 속도오차는 0으로 수렴하며 광역적인 수렴특성을 갖는다.

매개변수의 수렴속도 향상을 위해서 제안된 3가지형태의 새로운 S-G 알고리즘은 컴퓨터 시뮬레이션 결과 매우 견실함을 알 수 있었다.

추후 과제로는 외란이 존재 할때의 S-G알고리즘과 확장된 로봇 매니플레이터의 제어문제, 유연한 로봇 매니플레이터의 제어문제 등이 있다.

참고문헌

- [1] A.L.Fradkov, " Speed-gradient scheme and its application in adaptive control problems, " Automation and Remote Control, pp.1333-pp.1342,1979.
- [2] A.L.Fradkov, Large-Scale Control Systems, Leningrad, '90
- [3] R.H.Middleton, G.C.Goodwin, "Adaptive computed torque control for rigid link manipulators", 25th IEEE.Conf. on Dec. and Contr., Athens, Greece, 1986.
- [4] J.J.Craig, P.Hsu, and S.S.Sastry, " Adaptive Control of Mechanical Manipulator, " Int'l.J.Robotics Res., Vol.6, pp.16-28, 1987.
- [5] R.Johansson. " Adaptive Control of Robot Manipulator Motion , " IEEE Trans.Robotics and Automation, Vol.6, No.4, pp.483-490, 1990.
- [6] P.Hsu, M.Bodson, S.S.Sastry and B.Paden, " Adaptive Identification and Control for Manipulators without Using Joint Accelerations, " IEEE Int'l. Conf.Robotics and Automation, pp.1210-1215, 1987.
- [7] W.Ham, " Adaptive Control Based on Explicit Model of Robot Manipulators, " IEEE.Trans.Automatic Control, Vol.1.38, No.4, pp.654-658, 1993.
- [8] J.J.Slotine and W.Li, "On the Adaptive Control of Robot Manipulators, " Int'l.J.Robotics Res., Vol.6, pp.49-59, 1987.
- [9] J.J.Slotine and W.Li, " Adaptive Robot Control : A New Perspective, " in Proc.26th.IEEE.Conf.Desision Contr., Dec. pp.192-198, 1989.
- [10] J.J.Slotine and W.Li, " Adaptive strategies in constrained manipulation, " in Proc.IEEE.Int'l.Conf.Robot.Automatic., pp.595-601, 1987.
- [11] J.J.Slotine and W.Li, " Adaptive manipulator control : A case study, " in Proc.IEEE.Int'l.Conf.Robot.Automatic., pp.1392-1400, 1987.
- [12] J.J.Craig, Introduction to Robotics : Mechanics and Control, Addison-Wesley, 1986.